



VŠB - Technická univerzita Ostrava

Univerzitní studijní programy

**Laboratorní optický systém pro měření tuhosti
robotických ramen**

**Laboratory Optical System for Robotics Arms
Rigidity Measurement**

Zadání bakalářské práce

Student: **Adrian Molin**

Studijní program: B3943 Mechatronika

Studijní obor: 3906R007 Automobilová elektronika

Téma: Laboratorní optický systém pro měření tuhosti robotických ramen
Laboratory Optical System for Robotics Arms Rigidity Measurement

Zásady pro vypracování:

1. Navrhňte a realizujte jednoduchý optický systém pro měření tuhosti (dílčích tuhostí) robotického ramene.
2. Proveďte praktické testy navrženého systému.
3. Odvoďte přesnosti měření metody.
4. Dosažené výsledky měření kriticky porovnejte s jinými metodami.

Seznam doporučené odborné literatury:

Podle doporučení vedoucího bakalářské práce.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Dr. Ing. Petr Novák**

Datum zadání: 16. 12. 2011

Datum odevzdání: 21. 5. 2012

prof. Dr. Ing. Petr Novák
vedoucí katedry

prof. Ing. Petr Noskievič, CSc.
prorektor pro studium

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením prof. Dr. Ing. Petra Nováka a uvedl v seznamu literatury všechny použité literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 18. 5. 2012

vlastnoruční podpis autora

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu prof. Dr. Ing. Petru Novákovi a Ing. Milanu Miholovi, Ph.D. za zájem, připomínky, zapůjčené podklady a čas, který věnovali mé práci.

Mé poděkování rovněž patří všem mým blízkým za podporu ve studiu.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá posuny robotnického ramene u manipulačního subsystému mobilního robotu ARES.

Dále porovnává naměřené výsledky s vypočtenými a s jinou metodou měření.

Klíčová slova

Robot, mobilní robot, ARES

Abstract

This bachelor thesis describes the robotic arm moves and a manipulation subsystem for the mobile robot ARES.

Also compares the measured results with calculated and with another method of measurement.

Key words

Robot, mobile robot, ARES

Obsah:

Zadání bakalářské práce	2
Prohlášení	3
Poděkování	4
Abstrakt	5
Obsah	6
1 Úvod	7
2 Realizace měření deformací manipulačního subsystému	9
2.1 Návrh měření a popis robotu	9
2.2 Ovládaní ramen robotu	13
2.3 Převodovka CSG-2UH	14
2.4 Teoretický výpočet	16
2.4.1 Rameno R1	16
2.4.2 Rameno R2	20
2.4.3 Rameno R1 a R2	23
3 Praktické testy navrženého systému	25
4 Porovnání výsledků měření s jinými metodami	30
5 Zhodnocení přesnosti měřené metody a závěrečné zhodnocení	31
Použitá literatura	32

1 Úvod

Roboty jsou relativně novým druhem strojů, jehož první průmyslově využitelné prototypy vznikaly v období let 1959 – 1961. Zaznamenaly však natolik rychlý rozvoj, že již v 80-tých letech byly běžně nasazovány ve strojírenské výrobě jako plnohodnotná zařízení, srovnatelná s technickou úrovní a ostatními stroji na pracovišti. Klasické technické systémy – stroje, zařízení, přístroje – mají za sebou až několikrát delší dobu vývoje a tomu odpovídá i ustálenost terminologie v určitém oboru. V robotice, která je založena na výsledcích mnoha vědních oborů, z nichž mnohé jsou stále ještě samy v etapě rychlého vývoje, jsou ještě některé pojmy celosvětově nesjednocené, i když rozdíly v jejich výkladu nejsou většinou významné. Sjednocení pojmů napomáhá internet, mezinárodní vědecká spolupráce, a některé významné monografie, jejichž autory jsou vědci z mnoha různých oborů a států z celého světa. [1]

U vývoje prvního průmyslového robotu byli američtí inženýři Georg Devol a Joseph Engelberger, kteří začali spolupracovat na jeho vývoji od roku 1956. Roboty byly nasazeny jako náhrada pracovníků, obsluhujících stroje pro lití pod tlakem, pro uvolnění žhavých a těžkých odlitků z formy. Robot měl sférickou kinematickou koncepci v polohovacím ústrojí a jeho konstruktéři velmi rozumně obešli problémy s elektropohonem použitím hydropohonů, které vyhověly jak z hlediska potřebných výkonů, tak i požadavků na řízení. Roboty se velmi osvědčily a také byly, většinou jako první roboty, licenčně vyráběny v dalších průmyslově vyspělých státech – 1967 v Anglii, 1968 ve Švédsku a Japonsku, a dalších evropských státech. [1]

Dodejme, že vývoj dalších typů robotů a jejich počet pak začal rychle narůstat, jednak v závislosti na technických možnostech, ale i na požadavcích průmyslu. Ty vyplynuly ze změněné situace na trhu od 70. let, kdy se hospodářská situace v západních státech podstatně zlepšila a začala převažovat převaha nabídky nad poptávkou u mnoha výrobků. Uživatelům již nestačily výrobky stejného typu a provedení, žádali jejich stále větší variabilitu pro různé aplikace, což znamenalo výrobu v menších sériích a nutnost přestavování výrobní techniky a její přeprogramování. [1]

Jistý vývoj, který se týkal robotiky, lze zaznamenat již v první polovině 40. let, tedy v období 2. světové války, kdy se v Los Alamos (USA) pracovalo na vývoji atomové bomby, a při experimentech s radioaktivními materiály bylo nutné fyziky a operátory chránit (odstínit). K tomu byly vyvinuty tzv. master-slave manipulátory – vlastně mechanismy, které byly prodlouženými rukama operátorů, kteří pracovali vně odstíněných prostor. Tyto manipulátory byly vlastně předchůdci dnešních servisních robotů a vyrábí se dodnes, ale již s vlastními pohony i s různou úrovní řídicích systémů a mobilitou. [1]

Využití mobilního robotu ARES je mnohostranné a proto, je-li potřeba, lze ho použít na libovolnou servisní úlohu. Robot uveze zátěž do 120 kg. Nelze ho použít do výbušného prostředí. Avšak existují podobné typy mobilních manipulačních robotů, přímo určené pro odstranění nebezpečných předmětů, jako je například na obrázku 1.



Obr. 1 – Mobilní robot

2 Realizace měření deformací manipulačního subsystému

Realizací měření deformací manipulačního mobilního robotu bylo nutné měřit z důvodu zjištění, jak velký je celkový pokles ramene při zatížení a následné ověření teoretickým výpočtem.

2.1 Návrh měření a popis mobilního robotu ARES

Manipulátor je popsán subsystém mobilního robotu (MR) ARES realizovaného na katedře robototechniky. [2]



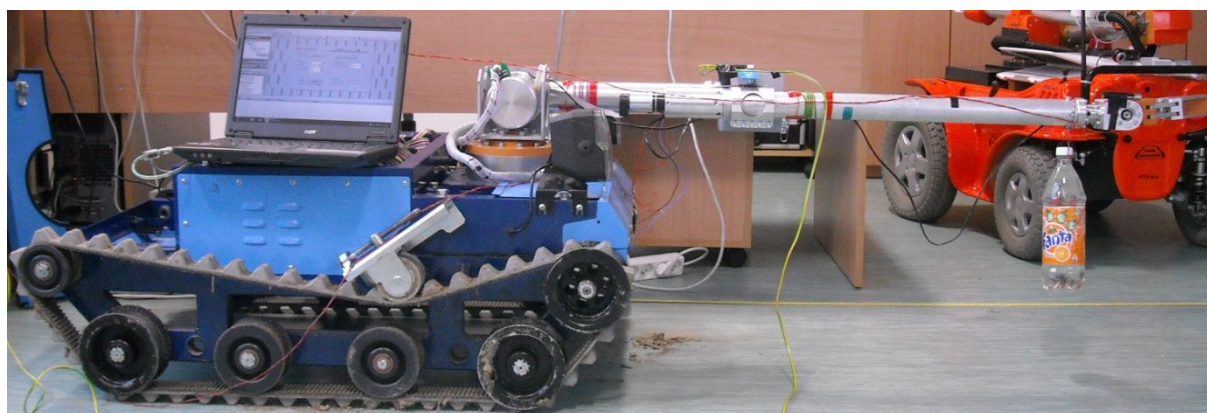
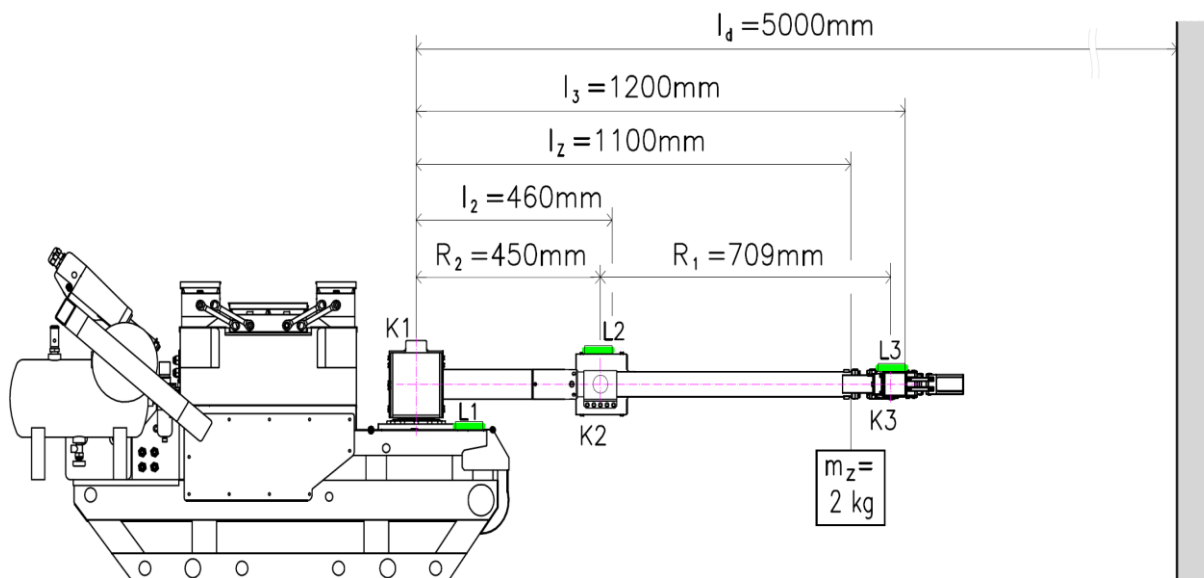
Obr. 2.1.1 – Mobilní robot ARES

Robot "Ares"

Podvozek:	pásový (12 neodpružených kol)
Řízení:	diferenciální řízení (kompaktní)
Pohon:	každá stopa řízena jedním kolem
Motory:	2 motory na stejnosměrný proud (600 W, 24 V)
Senzory:	kamera na přední straně
Řídicí systém:	dálkové ovládání pomocí počítače
Rozměry:	1253 x 731 x 810 mm

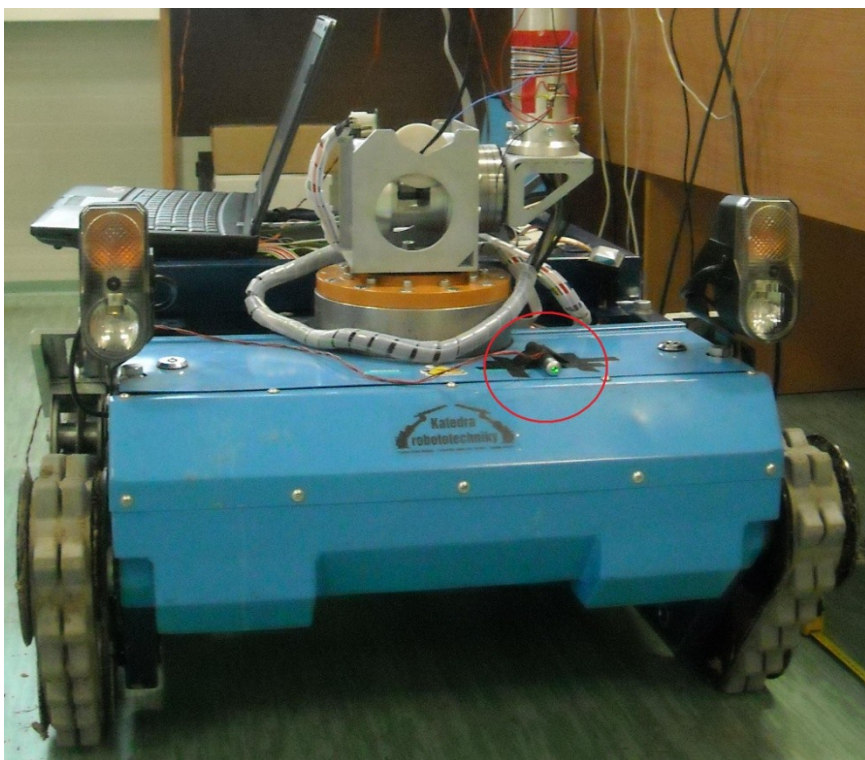
Pro měření deformací manipulačního subsystému – robotického ramene skládajícího se ze dvou částí, byla navržena a realizována metoda využívající laserových diod (ukazovátek). Jejich umístění je znázorněno na obrázku 2.1.2. Princip měření je založen na přenosu deformace ramene (respektive jeho dvou částí) optickou cestou (paprskem laserových diod)

na stěnu. Při dostatečné vzdálenosti této stěny od ramene je patrná změna polohy (výchylka) stop paprsků (bodů) vytvořených laserovými diodami L2 a L3. Vzdálenost l_d mezi stěnou a kloubem K1 byla 5 m. Dále popsáný výpočet vychází z podobnosti trojúhelníků. [2]



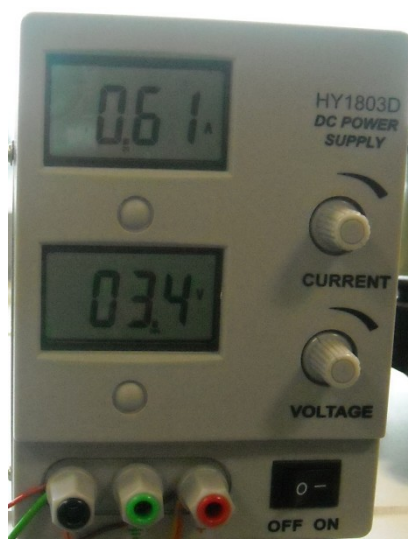
Obr. 2.1.2 – Měření deformace ramene, umístění měřících laserových diod
L1,2,3 – laserové diody; K1,2,3 - klouby

Vzhledem k tomu, že celá manipulační nadstavba je umístěna na odpruženém testovacím podvozku, dochází během měření k jejímu naklonění. K eliminaci tohoto náklonu z měření je měřicí systém doplněn třetí laserovou diodou – L1. Tato dioda je umístěna na základní karoserii robotu (obr. 2.1.3). Vůči této základně je výsledné měření deformace vztahováno. [2]



Obr. 2.1.3 – Laserová dioda L1

Laserové diody byly napájeny 3,4 V ze zdroje (obr. 2.1.4) všechny najednou, aby se nemusely jednotlivé laserové diody neustále zapínat a vypínat.

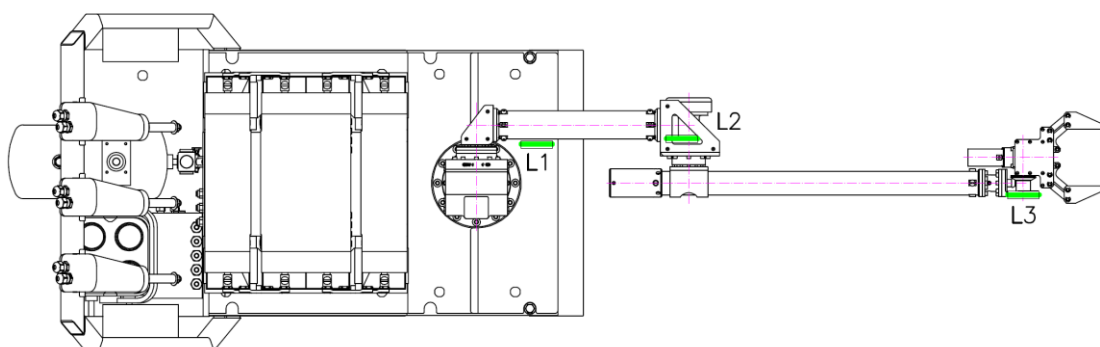


Obr. 2.1.4 – Použitý napájecí zdroj pro laserové diody (ukazovátka)

Cílem toho měření bylo získat hodnoty deformací na konci prvního ramene – tedy v místě uchycení L2 (obr. 2.1.5) a na konci celého manipulačního subsystému, tedy v místě uchycení L3 (obr. 2.1.5). Výsledky tohoto měření jsou v závěru porovnány s teoretickými vypočtenými hodnotami. [2]



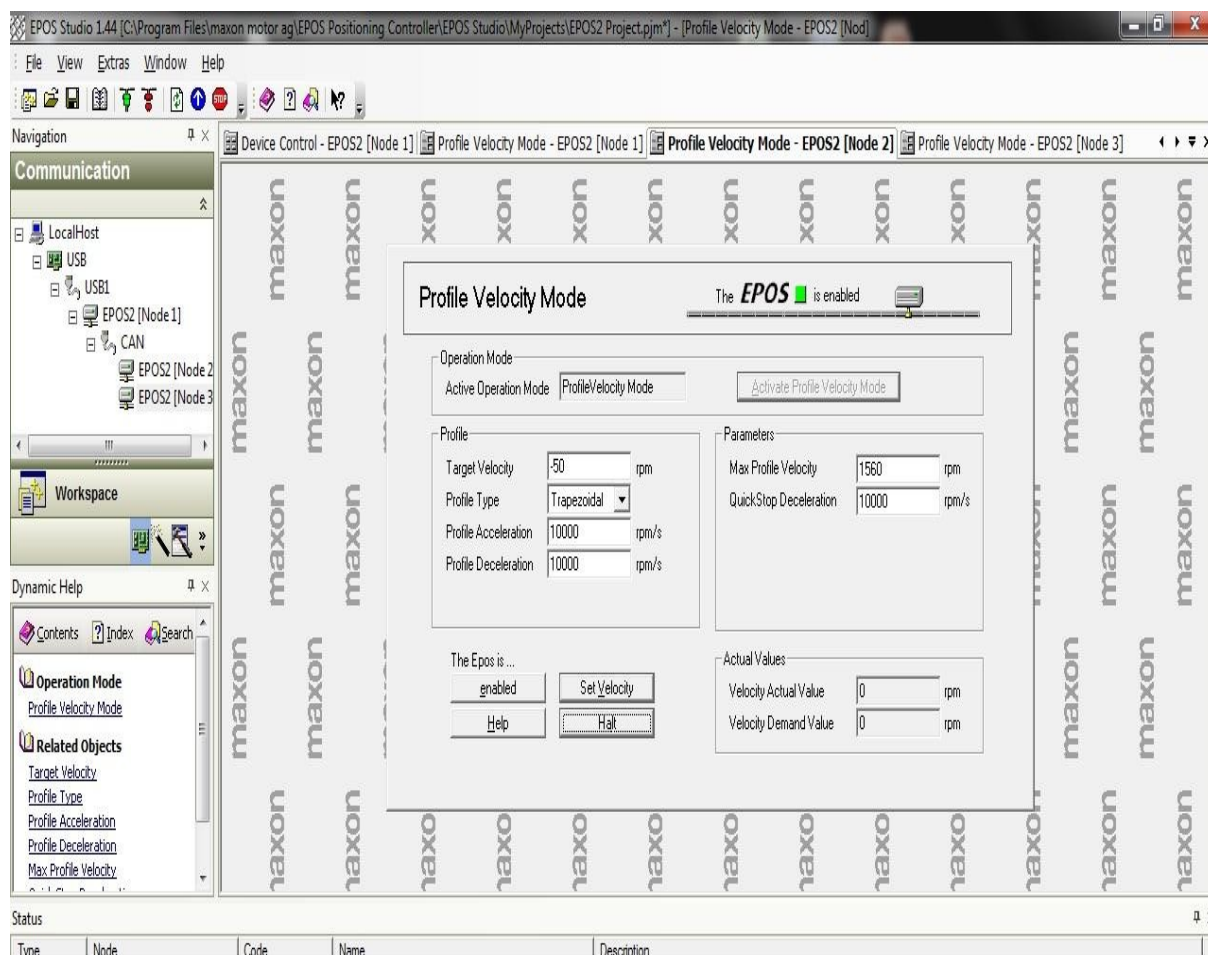
Obr. 2.1.5 – Umístění laserové diody L2 a L3



Obr. 2.1.6 – Pohled shora

2.2 Ovládání pohonů kloubů ramen

Pro ovládání pohonů kloubů ramene robotu ARES jsou použity motory Maxon, řízené jednotkami EPOS. Pro jejich ovládání jsem použil program EPOS Studio 1.44 firmy Maxon. (obrázek 2.2).



Obr. 2.2 – EPOS Studio 1.44

Kde jednotlivé klouby (K1,2) jsem ovládal pomocí záložek Profile Velocity Mode – EPOS2.

Profile Velocity Mode – EPOS2 [Node 1] – ovládání kloubu K1 v rotačním směru kolem své osy

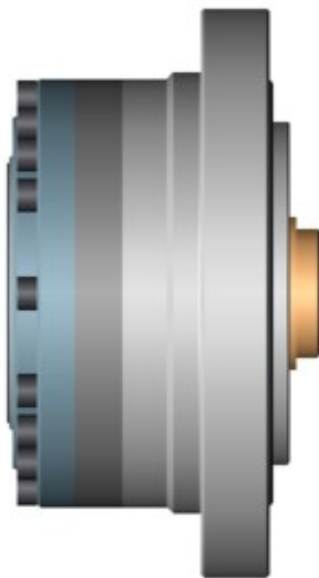
Profile Velocity Mode – EPOS2 [Node 2] – ovládání kloubu K1 dolů a nahoru

Profile Velocity Mode – EPOS2 [Node 3] – ovládání kloubu K2

Rychlost pohybu kloubů jsem nastavoval u Target Velocity v podsložce Profile, kterou jsem volil od -100 rpm do 100 rpm podle potřeby.

2.3 Převodovka CSG-2UH

U tohoto mobilního robotu ARES je použita harmonická převodovka CSG-2UH – 160 – 20, která je vyráběná Harmonic Drive AG. Identické pohonné jednotky jsou použity u všech tří rotačních kloubů.



Obr. 2.3a – CSG-2UH – 160 – 20

CSG-2UH řady kombinují sadu komponent s vysokou tuhostí příčného ložiska. CSG komponent sady mají výrazný nárůst točivého momentu objemu a jmenovitého provozního života. Klíčové měření a montážní rozměry jsou stejné jako u HFUC jednotek. Potřebujeme-li další podpůrné ložiska, můžeme to odstranit použitím vysokokapacitního výstupního ložiska. Tím se výrazně snižují konstrukční a výrobní náklady. CSG jednotky se vyznačují vysokou přesností a kompaktními rozměry. [3]

Výhody: [3]

- Vysoká kapacita točivého momentu a životnost
- Vysoká kapacita výstupního ložiska
- Vynikající přesnost polohování a opakovatelnost
- Kompaktní design
- Vysoké jednostupňové poměry
- Vysoká torzní tuhost
- Nulové vůle
- Vysoká účinnost
- Snadná instalace a montáž

Konkrétní katalogové údaje pro harmonickou převodovku CSG-2UH – 160 – 20: [3]

Přesný převod

Velikost převodu: 20

Převodový poměr: 160

Jmenovitý výstupní točivý moment: 52 Nm

Omezení opakovaného maximálního převodového točivého momentu: 120 Nm

Omezení krátkého maximálního točivého momentu: 191 Nm

Výstupní ložisko

Přípustný dynamický moment náklonu: 91 Nm

Přípustné dynamické axiální zatížení: 3511 N

Přípustné dynamické radiální zatížení: 2354 N



Obr. 2.3b – CSG-2UH – 160 – 20

Samotná převodovka má vliv na pohyblivost ramen jak se zátěží, tak bez zátěže. Proto jsem z příslušných katalogů zahrnul a použil vzorce a hodnoty pro výpočty.

2.4 Teoretický výpočet

Moment T se rovná síle hmotnosti objektu manipulace (OM) a efektoru nebo síle vyvozenou vlastní hmotností ramene, přímo úměrnou vzdálenosti působíště od středu příruby. Objekt manipulace vychází ze zadání z požadavkového listu manipulační nástavby, vytvořeném v programu ProEngineer a následně byly ověřeny na reálné manipulační nadstavbě. Analýzu provedl Ing. Ondřej František. Soustava byla analyzována metodou konečných prvků. Těžiště efektoru a ramen bylo také určeno na základě 3D modelu.

Potřebné hodnoty jsou zahrnuty v působíštích tíhy A, B, C a jejich vzdáleností l_A , l_B , l_C na základě získaných podkladů [4]. Můžeme tedy moment T a výsledný posun d vypočítat následovně:

2.4.1 Rameno R1:

$A = 36,74 \text{ N}$ – síla hmotnosti OM + efektoru

$B = 33,38 \text{ N}$ – síla vyvozená vlastní hmotností ramene R1

$l_A = 756 \text{ mm}$ – vzdálenost působíště tíhy A od středu příruby

$l_B = 311 \text{ mm}$ – vzdálenost působíště tíhy B od středu příruby

$m_z = 2 \text{ kg}$ – hmotnost OM

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ – tíhové zrychlení

E: Static Structural

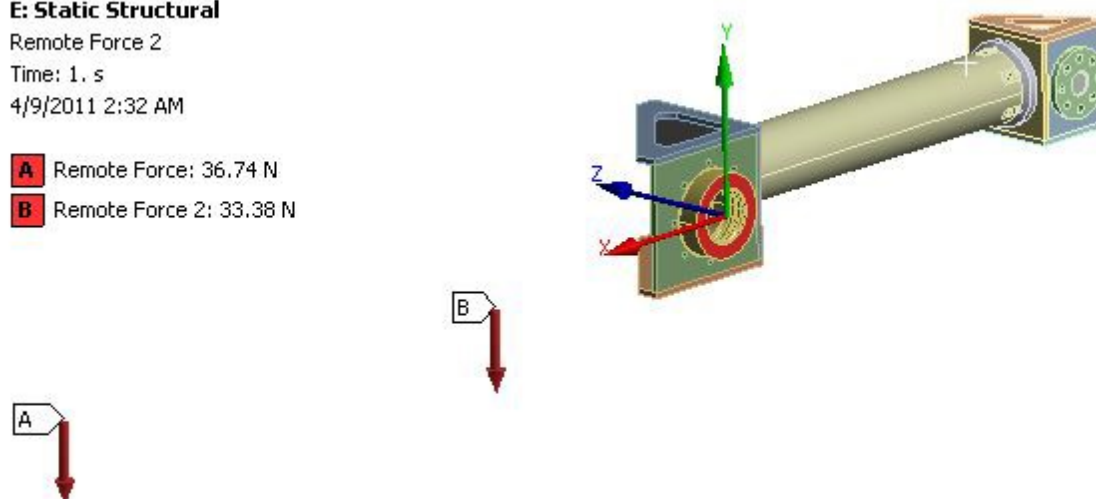
Remote Force 2

Time: 1. s

4/9/2011 2:32 AM

A Remote Force: 36.74 N

B Remote Force 2: 33.38 N



Obr. 2.4.1.1 – Zatížení ramene R1 [4] – vysvětlivky viz výše v textu

Z katalogu pro převodovky série CSG-2UH, jsem čerpal hodnoty torzní tuhosti, viz tab. 2.4.1.1.

CSG-2UH Baugröße / Size		14	17	20	25	32	40	45	50	58	65
T ₁ [Nm]		2	3,9	7	14	29	54	76	108	168	235
T ₂ [Nm]		6,9	12	25	48	108	196	275	382	598	843
i = 50	K ₃ [Nm/rad]	0,57x10 ⁴	1,30x10 ⁴	2,3x10 ⁴	4,4x10 ⁴	9,8x10 ⁴	1,8x10 ⁵	2,6x10 ⁵	3,4x10 ⁵	5,4x10 ⁵	7,8x10 ⁵
	K ₂ [Nm/rad]	0,47x10 ⁴	1,10x10 ⁴	1,8x10 ⁴	3,4x10 ⁴	7,8x10 ⁴	1,4x10 ⁵	2,0x10 ⁵	2,8x10 ⁵	4,4x10 ⁵	6,1x10 ⁵
	K ₁ [Nm/rad]	0,34x10 ⁴	0,81x10 ⁴	1,3x10 ⁴	2,5x10 ⁴	5,4x10 ⁴	1,0x10 ⁵	1,5x10 ⁵	2,0x10 ⁵	3,1x10 ⁵	4,4x10 ⁵
i > 50	K ₃ [Nm/rad]	0,71x10 ⁴	1,6x10 ⁴	2,9x10 ⁴	5,7x10 ⁴	1,2x10 ⁵	2,3x10 ⁵	3,3x10 ⁵	4,4x10 ⁵	7,1x10 ⁵	9,8x10 ⁵
	K ₂ [Nm/rad]	0,61x10 ⁴	1,4x10 ⁴	2,5x10 ⁴	5,0x10 ⁴	1,1x10 ⁵	2,0x10 ⁵	2,9x10 ⁵	4,0x10 ⁵	6,1x10 ⁵	8,8x10 ⁵
	K ₁ [Nm/rad]	0,47x10 ⁴	1,0x10 ⁴	1,6x10 ⁴	3,1x10 ⁴	6,7x10 ⁴	1,3x10 ⁵	1,8x10 ⁵	2,5x10 ⁵	4,0x10 ⁵	5,4x10 ⁵

Tab. 2.4.1.1 – Torzní tuhost pro CSG-2UH – 160 – 20

kde:

rozměrová řada = 20 a převodový poměr i = 160

T, T₁, T₂ – výstupní momenty na přírubě harmonické převodovky vyvolané vlastní hmotností manipulačních ramen bez, respektive s uvažováním OM [Nm]

K₁, K₂, K₃ – koeficienty tuhosti dané harmonické jednotky [Nm/rad]

Výpočet momentu T s OM:

$$T = A \cdot l_A + B \cdot l_B = 36,74 \cdot 0,756 + 33,38 \cdot 0,311 = 38,156 \text{ Nm}$$

Výpočet momentu T bez OM:

$$T = (A - m_z \cdot g) \cdot l_A + B \cdot l_B = (36,74 - 2 \cdot 9,81) \cdot 0,756 + 33,38 \cdot 0,311 = 23,324 \text{ Nm}$$

Z hodnot momentů T vypočteme torzní úhly φ :

Pomocí vztahů z katalogu pro převodovky CSG-2UH vypočteme torzní úhly φ , které jsou rozděleny do nízké, střední a vysoké momentové oblasti. V mém případě počítám se střední oblasti bez OM a pro vysokou oblast s OM.

$T \leq T_1$ – nízká oblast

$T_1 < T \leq T_2$ – střední oblast

$T > T_2$ – vysoká oblast

$$\varphi = \frac{T}{K_1}$$

$$\varphi = \frac{T_1}{K_1} + \frac{T-T_1}{K_2}$$

$$\varphi = \frac{T_1}{K_1} + \frac{T_2-T_1}{K_2} + \frac{T-T_2}{K_3}$$

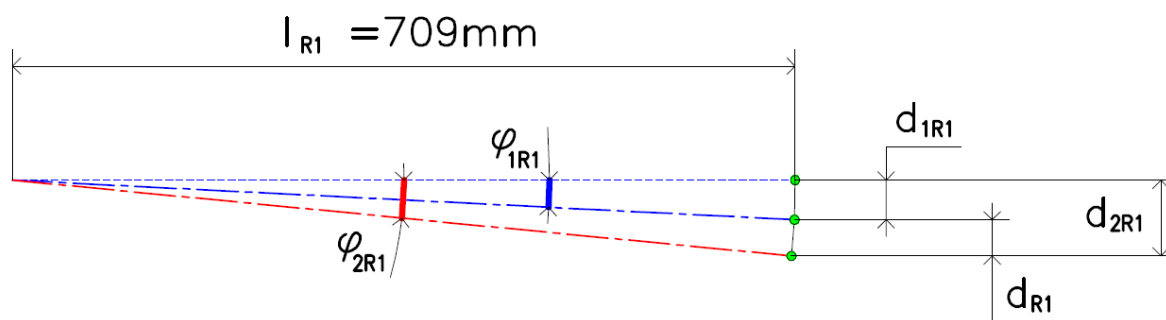
pro $T_1 < T \leq T_2$ bez OM je hodnota $T_1 = 7 \text{ Nm}$ z tab. 2.4.1.1 a hodnota $T = 23,324 \text{ Nm}$

$$\varphi_{1R1} = \frac{T_1}{K_1} + \frac{T - T_1}{K_2} = \frac{7}{16000} + \frac{23,324 - 7}{25000} = 0,0004375 + 0,000653 = 0,0010905 \text{ rad} \\ = 0,0625^\circ$$

pro $T > T_2$ s OM jsou hodnoty $T_1 = 23,324 \text{ Nm}$, $T = 38,156 \text{ Nm}$ a $T_2 = 25 \text{ Nm}$ z tab. 2.4.1.1

$$\varphi_{2R1} = \frac{T_1}{K_1} + \frac{T_2 - T_1}{K_2} + \frac{T - T_2}{K_3} = \frac{23,324}{16000} + \frac{25 - 23,324}{25000} + \frac{38,156 - 25}{29000} = \\ = 0,00146 + 0,000067 + 0,000454 = 0,00198 \text{ rad} = 0,113^\circ$$

Dále popsáný výpočet vychází z podobnosti trojúhelníků dle obr. 2.4.1.2:



Obr. 2.4.1.2 – Pokles ramene R1

$$\sin \varphi_{1R1} = \frac{d_{1R1}}{l_{R1}} \Rightarrow d_{1R1} = \sin \varphi_{1R1} \cdot l_{R1} = \sin 0,0010905 \cdot 709 = 0,773 \text{ mm}$$

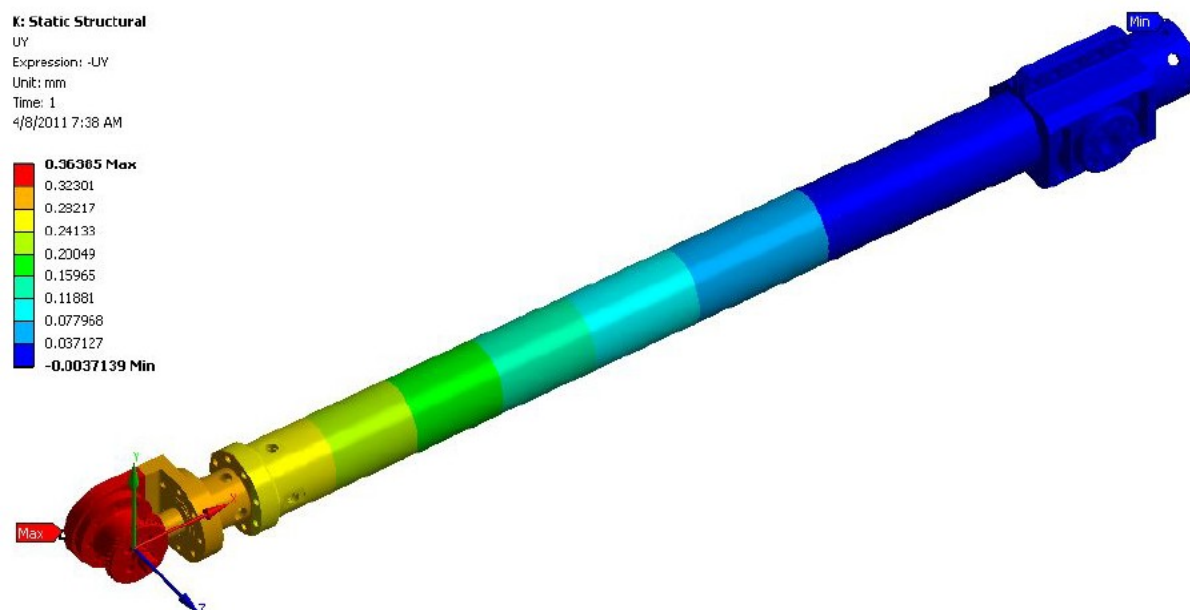
- v hodnotě d_{1R1} je zahrnuta pouze vlastní hmotnost ramene a efektoru

$$\sin \varphi_{2R1} = \frac{d_{2R1}}{l_{R1}} \Rightarrow d_{2R1} = \sin \varphi_{2R1} \cdot l_{R1} = \sin 0,00198 \cdot 709 = 1,404 \text{ mm}$$

- v hodnotě d_{2R1} je zahrnuta vlastní hmotnost ramene, efektoru a OM

Ve vypočtených hodnotách vyšly údaje jen s deformací pružného členu harmonické převodovky, proto musíme k vypočteným hodnotám ještě připočíst vlastní deformaci ramene R1 bez OM a s OM.

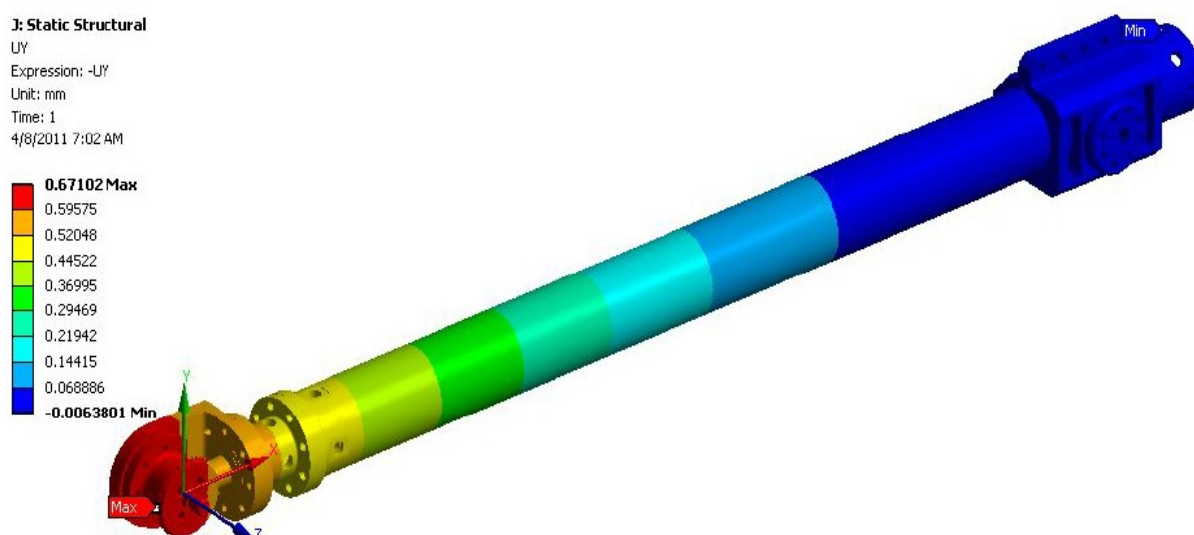
Vlastní deformace ramene R1 v ose rotace kloubu efektoru bez OM je 0,36 mm:



Obr. 2.4.1.3 – Pole posunutí ve svislém směru ramene R1 bez OM [4]

$$d_{1R1d} = d_{1R1} + 0,36 = 0,773 + 0,36 = 1,133 \text{ mm}$$

Vlastní deformace ramene R1 v ose rotace kloubu efektoru s OM je 0,67 mm:



Obr. 2.4.1.4 – Pole posunutí ve svislém směru ramene R1 s OM [4]

$$d_{2R1d} = d_{2R1} + 0,67 = 1,404 + 0,67 = 2,074 \text{ mm}$$

Nyní můžeme odečíst pokles ramene R1 se zatížením OM s vlastní deformací od OM bez zatížení s vlastní deformací.

$$d_{R1} = d_{2R1d} - d_{1R1d} = 2,074 - 1,133 = 0,941 \text{ mm}$$

Teoretická hodnota poklesu ramene R1 je $d_{R1} = 0,941 \text{ mm}$.

2.4.2 Rameno R2:

Podobně budeme počítat i pro rameno R2

$$A = 36,74 \text{ N}$$

$$B = 33,38 \text{ N}$$

$C = 67,3 \text{ N}$ – síla vlastní hmotnosti ramene R2 a pohonné jednotky mezi rameny R1 a R2

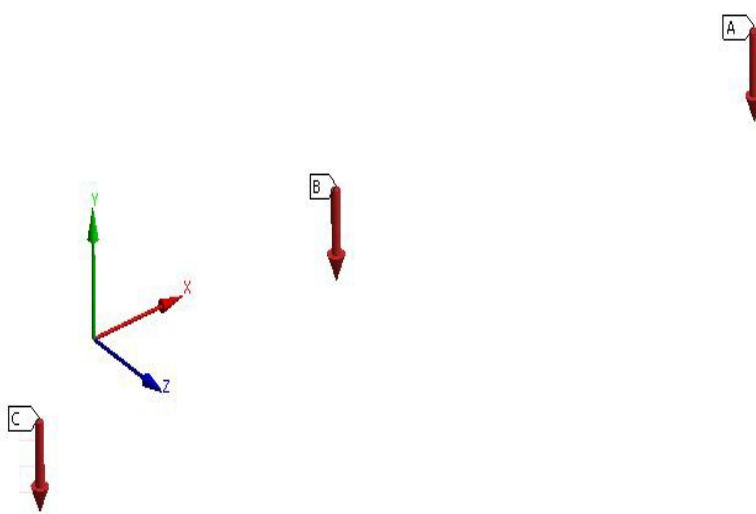
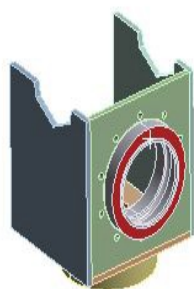
$$l_A = 1206 \text{ mm}$$

$$l_B = 761 \text{ mm}$$

$$l_C = 335,2 \text{ mm}$$

Remote Force 4
Time: 1. s
4/9/2011 4:08 AM

A Remote Force: 36.74 N
B Remote Force 2: 33.38 N
C Remote Force 4: 67.3 N



Obr. 2.4.2.1 – Zatížení rameno R2 [4] – vysvětlivky viz výše v textu

Výpočet momentu T s OM:

$$T = A \cdot l_A + B \cdot l_B + C \cdot l_C = 36,74 \cdot 1,206 + 33,38 \cdot 0,761 + 67,3 \cdot 0,3352 = 92,27 \text{ Nm}$$

Výpočet momentu T bez OM:

$$T = (A - m_z \cdot g) \cdot l_A + B \cdot l_B + C \cdot l_C = \\ = (36,74 - 2 \cdot 9,81) \cdot 1,206 + 33,38 \cdot 0,761 + 67,3 \cdot 0,3352 = 68,61 \text{ Nm}$$

Z hodnot momentů T vypočteme torzní úhly φ :

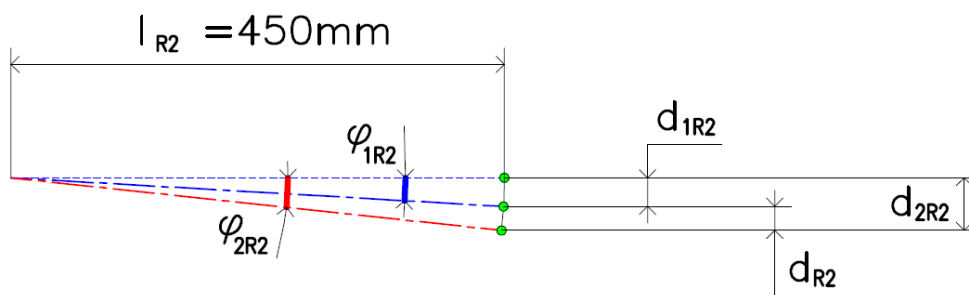
pro $T_1 < T \leq T_2$ bez OM je hodnota $T_1 = 7 \text{ Nm}$ z tab. 2.4.1.1 a hodnota $T = 68,61 \text{ Nm}$

$$\varphi_{1R2} = \frac{T_1}{K_1} + \frac{T - T_1}{K_2} = \frac{7}{16000} + \frac{68,61 - 7}{25000} = 0,000437 + 0,00246 = 0,0029 \text{ rad} \\ = 0,166^\circ$$

pro $T > T_2$ s OM jsou hodnoty $T_1 = 68,61 \text{ Nm}$, $T = 92,27 \text{ Nm}$ a $T_2 = 25 \text{ Nm}$ z tab. 2.4.1.1

$$\varphi_{2R2} = \frac{T_1}{K_1} + \frac{T_2 - T_1}{K_2} + \frac{T - T_2}{K_3} = \frac{68,61}{16000} + \frac{25 - 68,61}{25000} + \frac{92,27 - 25}{29000} = \\ = 0,0043 - 0,00174 + 0,00232 = 0,00488 \text{ rad} = 0,28^\circ$$

Dále popsáný výpočet vychází z podobnosti trojúhelníků dle obr. 2.4.2.2:



Obr. 2.4.2.2 – Pokles ramene R2

$$\sin \varphi_{1R2} = \frac{d_{1R2}}{l_{R2}} \Rightarrow d_{1R2} = \sin \varphi_{1R2} \cdot l_{R2} = \sin 0,0029 \cdot 450 = 1,305 \text{ mm}$$

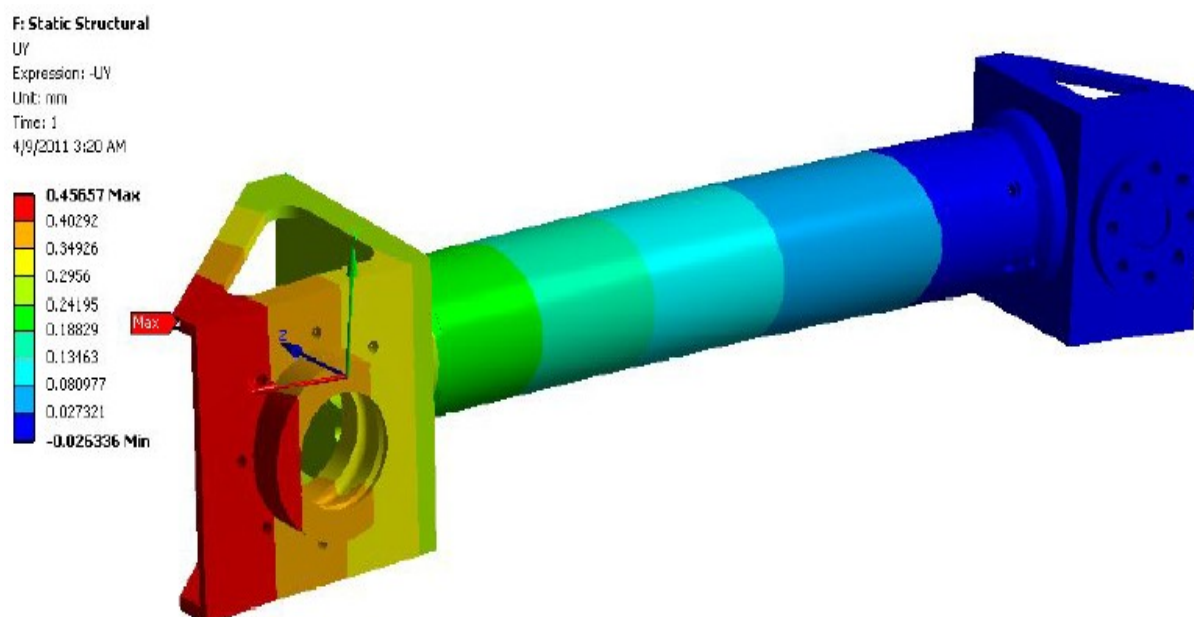
- v hodnotě d_{1R2} je zahrnuta pouze vlastní hmotnost ramene a efektoru

$$\sin \varphi_{2R2} = \frac{d_{2R2}}{l_{R2}} \Rightarrow d_{2R2} = \sin \varphi_{2R2} \cdot l_{R2} = \sin 0,00488 \cdot 450 = 2,196 \text{ mm}$$

- v hodnotě d_{2R2} je zahrnuta vlastní hmotnost ramene, efektoru a OM

Ve vypočtených hodnotách vyšly údaje jen s deformací pružného členu harmonické převodovky, proto musíme k vypočteným hodnotám ještě připočíst vlastní deformaci ramene R2 bez OM a s OM.

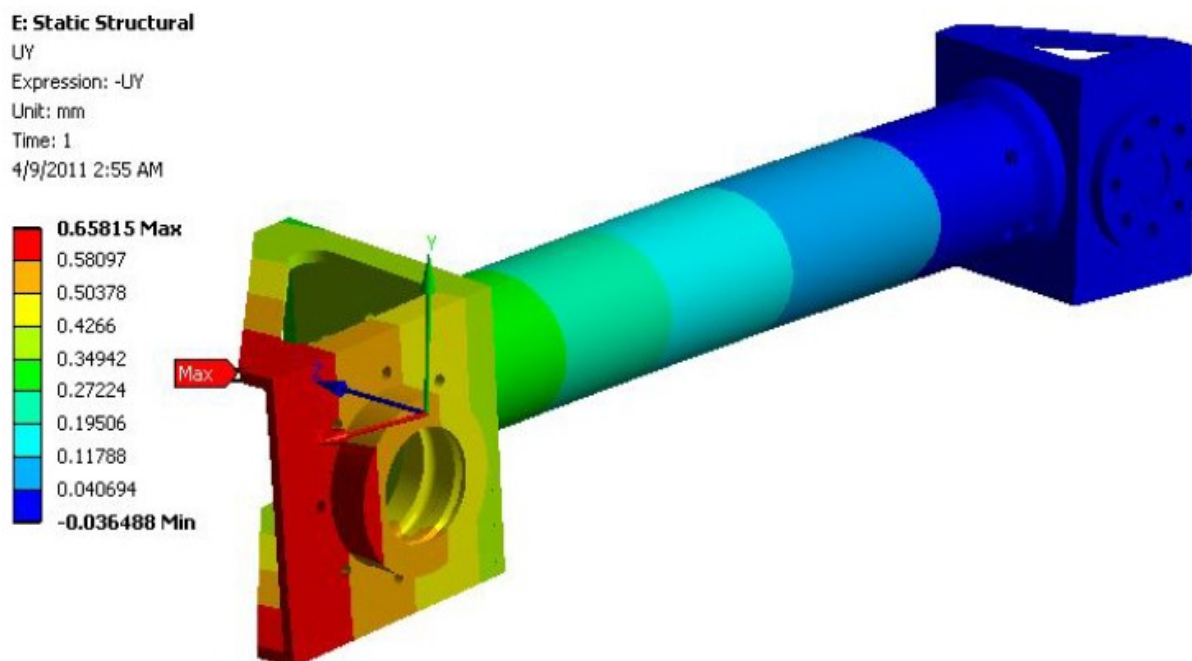
Vlastní deformace ramene R2 v ose rotace kloubu bez OM je 0,457 mm:



Obr. 2.4.2.3 – Pole posunutí ve svislém směru ramene R2 bez OM [4]

$$d_{1R2d} = d_{1R2} + 0,457 = 1,305 + 0,457 = 1,762 \text{ mm}$$

Vlastní deformace ramene R2 v ose rotace kloubu s OM je 0,66 mm:



Obr. 2.4.2.4 – Pole posunutí ve svislém směru ramene R2 s OM [4]

$$d_{2R2d} = d_{2R2} + 0,66 = 2,196 + 0,66 = 2,856 \text{ mm}$$

Nyní můžeme odečíst pokles ramene R2 se zatížením OM s vlastní deformací od OM bez zatížení s vlastní deformací.

$$d_{R2} = d_{2R2d} - d_{1R2d} = 2,858 - 1,762 = 1,094 \text{ mm}$$

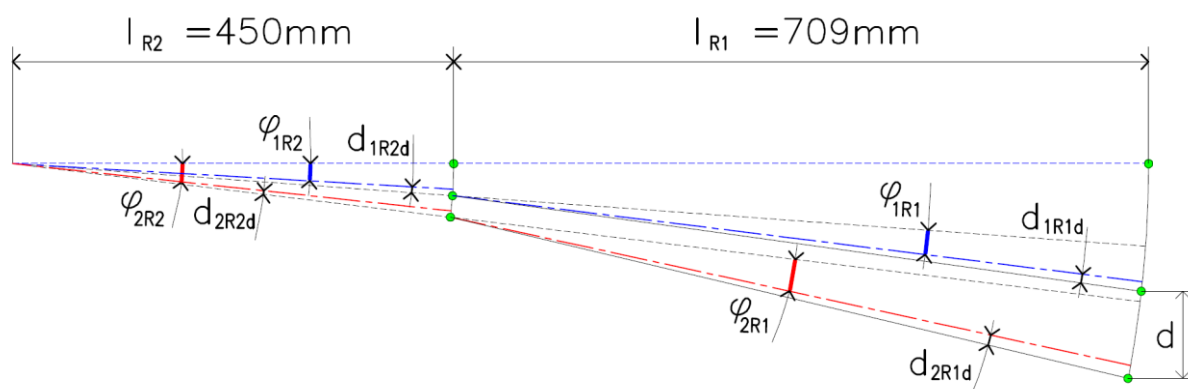
Teoretická hodnota poklesu ramene R2 je $d_{R2} = 1,094 \text{ mm}$.

2.4.3 Rameno R1 a R2

Chceme-li dosáhnout výsledného poklesu ramene R1 a R2 dohromady, musíme sečíst hodnoty bez OM s vlastní deformací d_{1R2d} a d_{1R1d} , a také hodnoty s OM s vlastní deformací d_{2R2d} a d_{2R1d} . Pak si spočítat nové úhly α už se započítanou deformací u ramene R2 jak s OM, tak bez OM. Díky novým úhlům vypočítáme vzdálenosti v_1 , v_2 a přičteme k výsledným poklesům ramen R1 a R2, d_1 a d_2 .

$$d_1 = d_{1R2d} + d_{1R1d} = 1,762 + 1,133 = 2,895 \text{ mm}$$

$$d_2 = d_{2R2d} + d_{2R1d} = 2,856 + 2,074 = 4,93 \text{ mm}$$



Obr. 2.4.3 – Ramena R1 a R2

– bez OM

$$\sin \alpha_1 = \frac{d_{1R2d}}{l_{R2}} = \frac{1,762}{450} = 0,0039 \text{ rad}$$

$$\sin \alpha_1 = \frac{v_1}{l_{R1}} \Rightarrow v_1 = \sin \alpha_1 \cdot l_{R1} = \sin 0,0039 \cdot 709 = 2,765 \text{ mm}$$

$$d_{1v} = d_1 + v_1 = 2,895 + 2,765 = 5,66 \text{ mm}$$

– s OM

$$\sin \alpha_2 = \frac{d_{2R2d}}{l_{R2}} = \frac{2,856}{450} = 0,00635 \text{ rad}$$

$$\sin \alpha_2 = \frac{v_2}{l_{R1}} \Rightarrow v_2 = \sin \alpha_2 \cdot l_{R1} = \sin 0,00635 \cdot 709 = 4,5 \text{ mm}$$

$$d_{2v} = d_2 + v_2 = 4,93 + 4,5 = 9,43 \text{ mm}$$

Následně odečteme pokles ramen se zatížením OM s vlastní deformací od OM bez zatížení s vlastní deformací. A dostaneme výslednou hodnotu d.

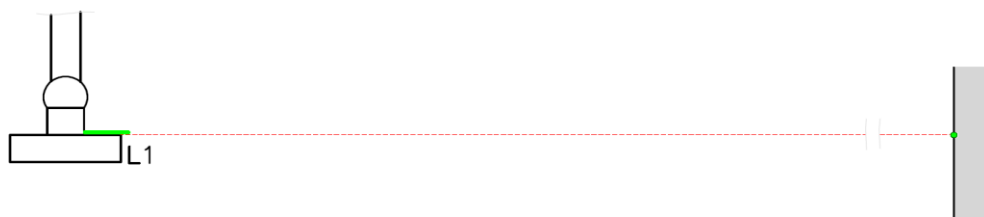
$$d = d_{2v} - d_{1v} = 9,43 - 5,66 \Rightarrow \mathbf{d = 3,77 \text{ mm}}$$

Výsledná teoretická hodnota poklesu ramen R1 a R2 se zátěží 2 kg je 3,77 mm.

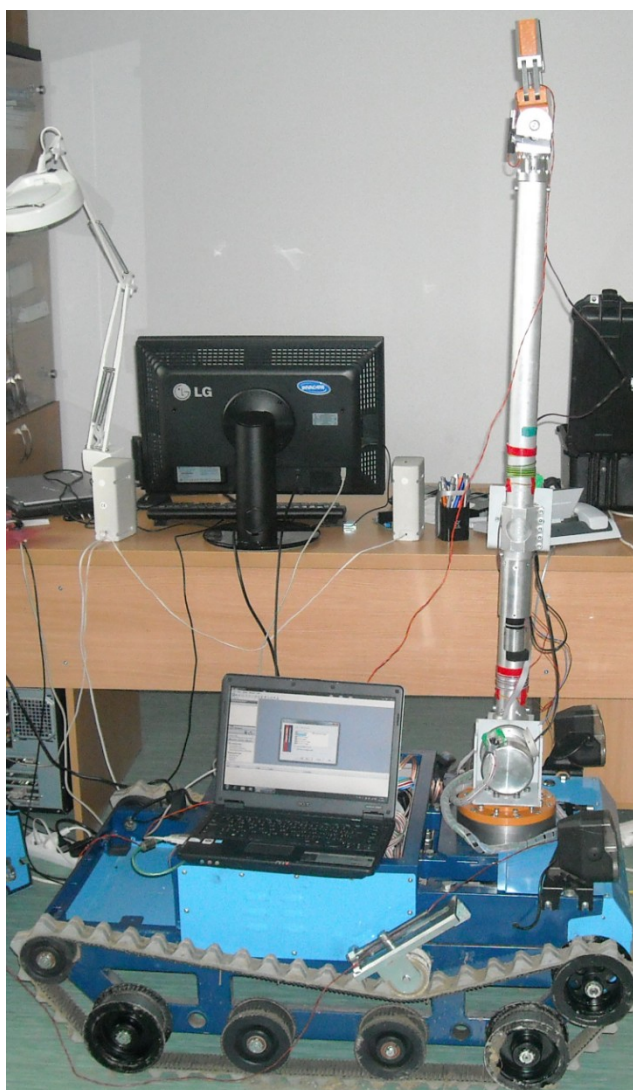
3 Praktické testy navrženého systému

Pro získání potřebných údajů byla provedena tato měření:

- a) Měření se vztyčenou manipulační nadstavbou – viz obrázek 3.1a a b. Cílem měření bylo zjistit polohu nenakloněného podvozku, respektive polohu paprsku na měřicí ploše – označeno zeleným bodem. [2]

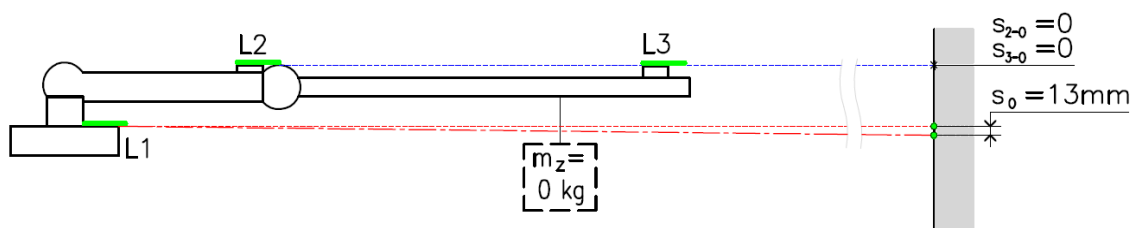


Obr. 3.1a – Označení polohy „roviny“ nenakloněného podvozku

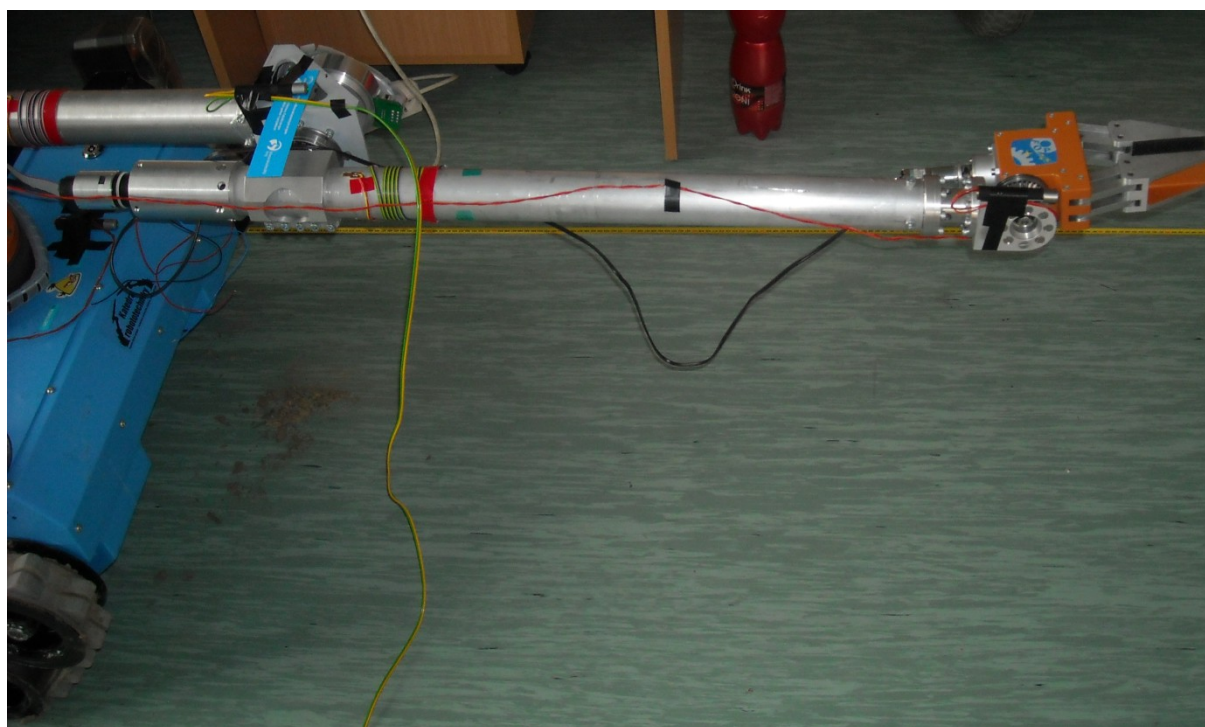


Obr. 3.1b - Měření se vztyčenou manipulační nadstavbou

b) Měření se sklopeným ramenem a zátěží $m_z = 0\text{ kg}$ – viz obrázek 3.2a a b.



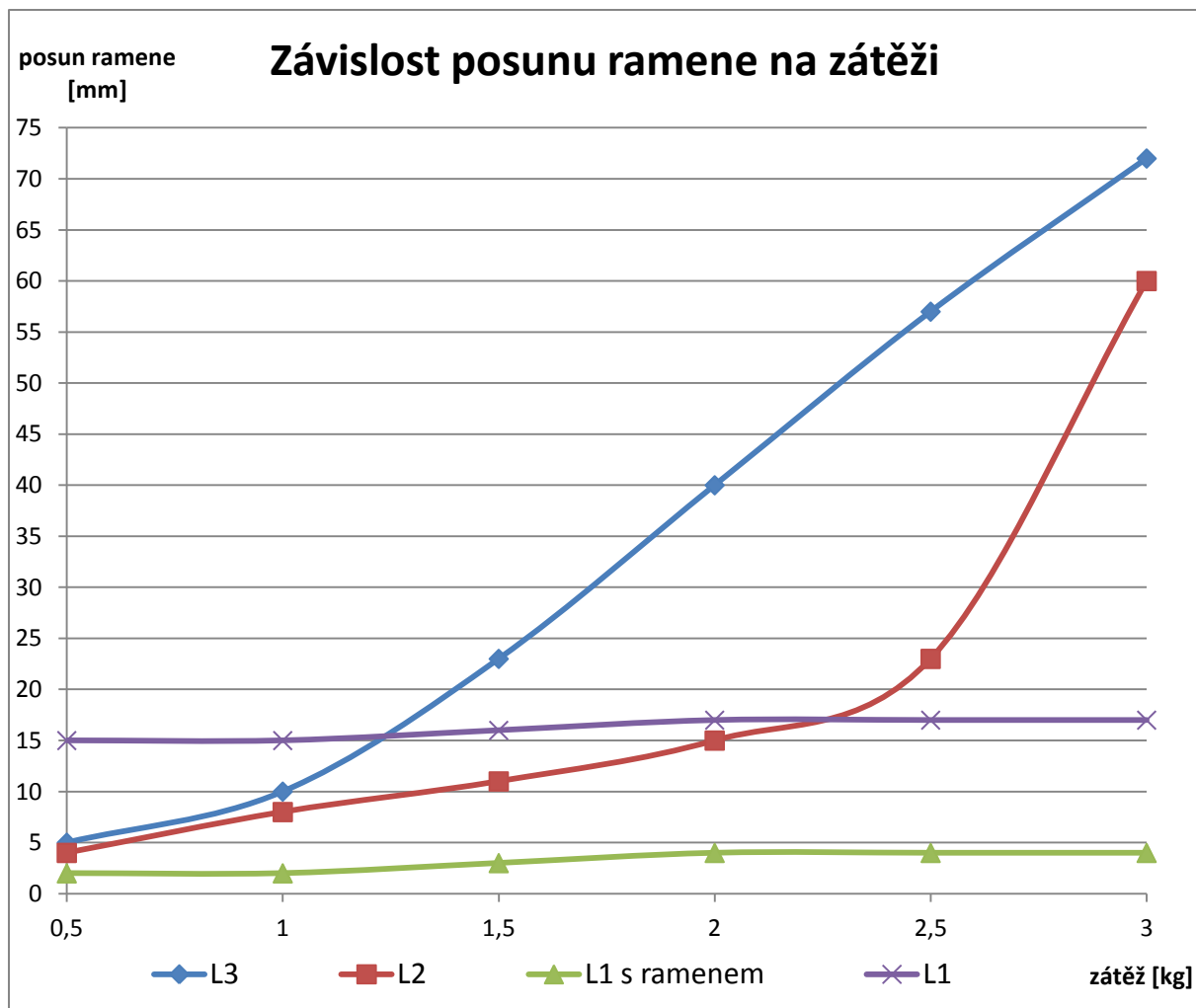
Obr. 3.2a – Pomocné měření náklonu podvozku – parametr s_0



Obr. 3.2b – Sklopené rameno s instalovanými měřicími laserovými ukazovátky

Toto měření zjišťuje pomocný parametr s_0 – náklon podvozku se sklopeným ramenem bez zátěže. Zároveň jsou v této poloze ramene ručně nasměrovány laserové diody L2 a L3. Z důvodu konstrukce ramene a kloubů jsem nemohl nasměrovat lasery do stejné horizontální roviny (uvažujme ale, že jsou v rovině pro zjednodušení měření). Poloha těchto paprsků je na měřicí ploše označena černým bodem. (Orientačně vypočtený náklon podvozku z parametrů s_0 a měřicí vzdálenosti konce laserové diody L1 činí $0,15^\circ$). [2]

$$\sin \alpha = \frac{s_0}{l_d} = \frac{13}{5000} \Rightarrow \alpha = 0,15^\circ$$



Graf 3.1 – Závislost posunu ramene na zátěži

L1, L2, L3 jsou jednotlivá laserová ukazovátka, umístěná na mobilním robotu, kde u L1 s ramenem je už měřeno s nakložením podvozku (při vlastní tíze ramen) v horizontální poloze.

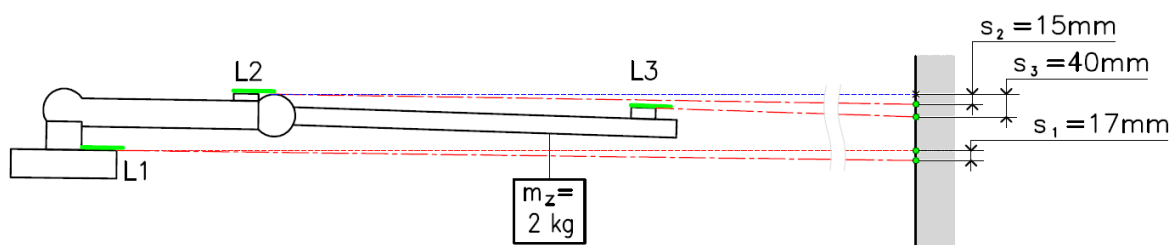
U laseru L2, označeném červenou barvou v grafu, umístěném na kloubu K2 (viz Obr. 2.1.2) je průběh poněkud silně nelineární. Je to způsobeno chybou měření nebo také poklesem ramene v okamžiku snímání údaje, kdy motor ramene nezvládl tíhu zatížení.

c) Měření se sklopeným ramenem a zátěžemi – viz tabulka 3.1, obr. 3.3 a graf 3.1

mm\kg	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
L1	-	15	15	16	17	17	17
L1 s ramenem	13	2	2	3	4	4	4
L2	-	4	8	11	15	23	60
L3	-	5	10	23	40	57	72

Tab. 3.1 – Tabulka s jednotlivými zátěžemi a poklesy

Rameno jsem zatěžoval hodnotami od 0,5 do 3 kg. Avšak nad 2,5 kg se údaje znehodnotily, protože motory kloubů u ramene nevládaly velikost zátěže a začaly povolovat. Nad 3 kg rameno neudrželo zátěž. Pro názorný výpočet jsem počítal se zátěží 2 kg.



Obr. 3.3 – Měření náklonu ramene způsobené zátěží $m_z = 2$ kg

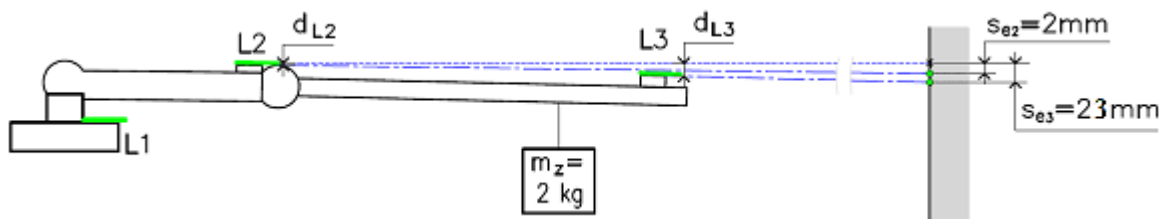
Kromě dalšího nárůstu výchylky paprsku měřicího náklon podvozku – a tedy i celé nadstavby byly změřeny výchylky paprsků diod L2 – $s_2 = 15$ mm a L3 – $s_3 = 40$ mm – viz obrázek 3.3.

Tyto údaje však již obsahují i náklon podvozku a tedy i celé nadstavby. Pro eliminaci tohoto náklonu jsou hodnoty s_2 a s_3 přepočteny na s_{e2} a s_{e3} . [2]

Výsledky tohoto přepočtu jsou znázorněny na obrázku 3.4. Je zde také vidět, že základna nadstavby je opět v rovině. Na obrázku jsou dvě důležité hodnoty – výchylka paprsku diody L2: $s_{e2} = 2$ mm a diody L3: $s_{e3} = 23$ mm. [2]

$$s_{e2} = s_2 - s_0 \Rightarrow 15 - 17 = |-2| \text{ mm}$$

$$s_{e3} = s_3 - s_0 \Rightarrow 40 - 17 = 23 \text{ mm}$$



Obr. 3.4 – Měření náklonu ramene způsobené zátěží $m_z = 2$ kg s přepočtem eliminujícím náklon podvozku

Z těchto výchylek vzdáleností k měřicí stěně a rozměrů ramen – viz údaje na obrázku 2.1.2, jsou vypočteny požadované hodnoty deformací:

Výchylka v L2*:

$$d_{L2}^* = l_2 \cdot \tan \alpha_{R2} = l_2 \cdot \frac{s_{e2}}{l_d} = 460 \cdot \frac{|-2|}{5000} = 0,184 \text{ mm}$$

Výchylka v L3*:

$$d_{L3}^* = d_{L2}^* + \tan \alpha_{R3} = d_{L2}^* + (l_3 - l_2) \cdot \frac{s_{e3} - d_{L2}^*}{l_d - l_2} = 0,184 + 740 \cdot \frac{23^* - 0,184}{4540} = 3,9 \text{ mm}$$

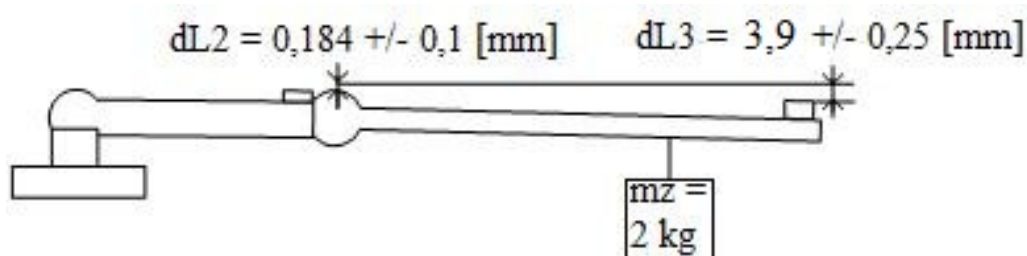
Hodnoty označené hvězdičkou je nutné doplnit údajem o přesnosti. Ze všech použitých hodnot ve výše uvedených výrazech je nejvíce zatížena chybou měření poloha/výchylka laserového paprsku na měřicí stěně. Vzhledem k tomu, že ozářený bod měl průměr kolem 3 – 5 mm, nebylo možno výchylku jeho středu měřit zcela přesně. Odhadnutá chyba měření výchylky bodu paprsků je cca 0,5 mm. Tato chyba se zpětně promítne do výsledků: [2]

Výchylka v L2:

$$d_{L2} = l_2 \cdot \frac{s_{e2}\{\pm 1\text{mm}\}}{l_d} = 460 \cdot \frac{2\{\pm 1\}}{5000} = \left\{ \frac{0,276}{0,092} \right\} \cong \mathbf{0,184 \pm 0,1 \text{ [mm]}}$$

Výchylka v L3:

$$\begin{aligned} d_{L3} &= \left\{ \frac{0,276}{0,092} \right\} + 740 \cdot \frac{s_{e3}\{\pm 1\text{mm}\} - \left\{ \frac{0,276}{0,092} \right\}}{l_d - l_2} = \\ &= \left\{ \frac{0,276}{0,092} \right\} + 740 \cdot \frac{23\{\pm 1\text{mm}\} - \left\{ \frac{0,276}{0,092} \right\}}{4540} = \left\{ \frac{4,14}{3,66} \right\} \cong \mathbf{3,9 \pm 0,25 \text{ [mm]}} \end{aligned}$$



Obr. 3.5 – Grafické znázornění výsledků měření

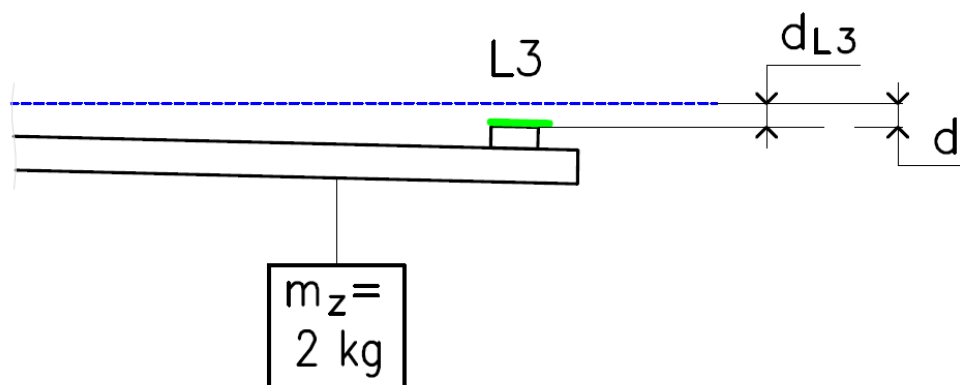
4 Dosažené výsledky měření kriticky porovnejte s jinými metodami

Porovnávat naměřené hodnoty jsem mohl jedině s analýzou zpracovanou v dokumentu **Pevnostní a tuhostní analýza ramen a patky mobilního robotu** [4], kterou vypracoval Ing. Ondřej František. Tuto analýzu jsem již také použil pro teoretický výpočet. Takže mohu použít údaje, kterých jsem se dopočítal.

Posuzovaným technickým zařízením, v této zprávě, jsou ramena a patka mobilního robotu. Zařízení slouží k uchopení a manipulaci s objektem manipulace o určité hmotnosti, pro daný případ se počítalo s 2 kg.

Pro dané zařízení byla provedena analýza posunutí. Posunutí bylo analyzováno pro dva zatěžovací stavy, a to konkrétně pouze pro zatížení vlastní tíhou ramene včetně vybavení a při zatížení od vlastní tíhy ramene, a současně od tíhy objektu manipulace. Analýza byla provedena pro nejméně příznivé uspořádání zařízení, což je případ, kdy všechna ramena jsou v horizontální poloze. Analýza byla provedena metodou konečných prvků.

Porovnání změřených výsledků s výsledky získanými teoretickým výpočtem se zátěží ramene 2 kg:



Obr. 4 – Pokles na konci ramene (rozdíl je velmi nepatrný)

teoretický výpočet:

$$d = 3,77 \text{ mm}$$

hodnota získaná měřením:

$$d_{L3} = 3,9 \pm 0,25 \text{ mm}$$

5 Závěrečné zhodnocení

Závěrem je možno prohlásit, že velikost vypočtené a naměřené výchylky v místě L3, tedy na konci ramene mobilního robotu, se liší jen o 0,13 mm, to vykazuje velmi dobrou shodu.

Ovšem další zpřesnění měřicí metody by bylo možné dosáhnout použitím ještě lepšími laserovými diodami s lepší optikou. Stopy paprsků (bodů) vytvořených laserovými diodami na stěně byly přibližně 3 – 5 mm široké a při vyhodnocování středů mohla vzniknout nepřesnost do cca 0,5 mm. Dále také zpřesnění katalogových hodnot pro výpočet, které nejsou zcela přesné, zvláště u větších zatížení.

Do teoretického výpočtu jsem musel zahrnout i harmonické převodovky v motorech kloubů, které mají vliv na výsledek, takže je nelze vypustit, pokud chceme přesnou hodnotu výchylky. A také jsem musel zahrnout vlastní deformaci ramene s objektem manipulace, respektive bez objektu manipulace.

Výrobce harmonické převodovky udává pouze konkrétní hodnoty pro torzní tuhosti, je však možné, že se velikosti těchto hodnot pohybují v určitém rozmezí a výrobce udává pravděpodobně střední hodnoty.

Navržený měřicí systém je možné použít i pro struktury s více klouby. Jen bychom museli zapojit více laserových diod (pro každý kloub) a také by se samozřejmě zkomplikoval samotný výpočet. Ten by byl náročnější o počet ramen, které bychom museli započítávat do vyhodnocení celkového zatížení sestavy manipulačního subsystému.

Literatura:

[1] Průmyslové roboty a manipulátory – učební text, Jiří Skařupa

[2] Manipulation subsystem of hercules mobile robot, Václav KRYŠ, Milan MIHOLA, Petr NOVÁK

[3] www.harmonicdrive.de

[4] Pevnostní a tuhostní analýza ramen a patky mobilního robotu, Ing. Ondřej František